

## 数値シミュレーションによる液滴群要素の着火・燃え広がりに関する研究

河本, 晃士  
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178594>

---

出版情報：九州大学, 2023, 修士, 修士  
バージョン：  
権利関係：



令和 5 年 度

修 士 論 文

数値シミュレーションによる液滴群要素の着火・燃  
え広がりに関する研究

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

エネルギー熱物理科学研究室

河本 晃士

指導教員 渡邊 裕章

提出年月日 令和 5 年 7 月 3 1 日

# 目次

## 第1章 緒言

- 1.1 背景
- 1.2 燃焼の分類
- 1.3 微小重力環境の利用
- 1.4 先行研究
- 1.5 目的

## 第2章 計算方法

- 2.1 支配方程式
- 2.2 輻射モデル
- 2.3 計算条件
  - 2.3.1 未燃焼ケース
  - 2.3.2 燃焼ケース

## 第3章 結果と考察

- 3.1 未燃焼ケースの解析結果と考察
- 3.2.1 燃焼ケースの解析結果と考察
- 3.2.2 冷炎に寄与する化学種の可視化

## 第4章 結言

- 4.1 まとめ
- 4.2 今後の課題と提案

## 参考文献

## 謝辞

## 第1章 緒言

### 1.1 背景

噴霧燃焼はジェットエンジン、油焚、ディーゼルエンジンといった多くの燃焼器に使われており、液体燃料の噴霧化、液滴の分散、燃料の蒸発、そして化学反応が同時に進む複雑な現象である。<sup>[1]</sup>

噴霧燃焼を連続的で安定に制御するためには噴霧火炎の基部で見られる群燃焼と呼ばれる複数の噴霧液滴が全体的に燃える現象を発現する必要があるが、未だに詳細な発現メカニズムは解明されていない。

炭化水素系燃料の燃焼において、初期段階において冷炎が発生し、その後に熱炎が発生するという二段点火現象が生じることが知られている。自動車用エンジンとして用いられる PCI や HCCI といった予混合圧縮燃焼において着火時期制御は非常に重要であり、燃料の自発点火現象の知見は必要不可欠である。ジェットエンジンやロケットエンジンの燃焼器においても同様に、安全で高性能な燃焼器設計のためには、自発点火に関する知見が不可欠である。

エンジンの開発において燃焼課程の数値シミュレーションが重要度を増しつつあり、液滴間の火炎の燃え広がりや群燃焼の発生過程を適切に取り扱うことができるモデルの構築が求められている。

### 1.2 燃焼の分類

#### a) 燃焼形態による分類

予混合燃焼…燃料と酸化剤が予め混ざっている状態で燃焼

拡散燃焼…燃料と酸化剤が燃焼域において拡散により混合し燃焼

#### b) 流れ場による分類

層流燃焼…火炎付近のガスの流れが層流である燃焼

乱流燃焼…火炎付近のガスの流れが乱流である燃焼。流れが層流から乱流に変わると、火炎の性質が大きく変化し、火炎の厚みが増すとともに、予混合燃焼では火炎の伝ば速度が加速され、拡散燃焼では火炎の単位面積当たりの燃焼率が増大する。

#### c) 燃料による分類

気体燃焼

①連続燃焼…バーナを使って流れの中に静止した火炎を作るもので、できるだけ変動の少ない連続した燃焼を行わせる。

②間欠燃焼…容器内に閉じ込めた可燃混合気に点火するか、容器内に閉じ込めた高温空気中に燃料を噴射して着火させることにより、間欠的に燃焼を起こさせる。

### 液体燃焼

- ①液面燃焼…火炎から燃料表面に輻射や対流で熱が伝えられて蒸発が起こり，発生した蒸気が空気と接触して，油面の上部で拡散燃焼を行う．
- ②灯心燃焼…毛細管現象によって灯心と呼ばれる布の一端から燃料を吸い上げて他端に移動させ，そこで燃焼熱を受けて蒸発した蒸気を拡散燃焼させるものである．
- ③噴霧燃焼…燃料を数  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  の無数の油滴に微粒化し，蒸発表面積を飛躍的に増加させて燃焼させる．
- ④蒸発燃焼…熱面で燃料を蒸発させて予混合燃焼や部分予混合燃焼させるもので，熱面には火炎により加熱される蒸発管や，電気加熱される蒸発面が使われる．

### 固体燃焼

- ①火格子燃焼…静止した燃料塊の層を燃焼用空気が通過する間に燃焼が起こるもので，火格子と呼ぶ金属製の格子の上に燃料を広げて下から空気を吹き込む．
- ②微粉燃焼…微粉碎された燃料を一次空気に乗せて吹き込み，二次空気と混合させながら燃焼させる．
- ③流動床燃焼…空気を吹き込まれて流動状態にある砂などの流動床に燃料粒子を散布して層内と層上部で燃焼させる．

## 1.3 微小重力環境の利用

実際の噴霧燃焼で用いられる液滴の液滴径は小さく，現象も高速であるため詳細な観察が困難である．そこで，実際の噴霧より大きなスケールの液滴を対象とする必要があるが，自然対流の影響を大きく受けてしまう．以下に自然対流を特徴づける無次元数を示す．

$$\text{Gr} = L^3 g \beta \frac{\Delta T}{\nu^2} \quad (1)$$

$L$ : 代表長さ， $g$ : 重力加速度， $\beta$ : 体膨張率， $\Delta T$ : 温度差， $\nu$ : 動粘性係数を表す．

微小重力環境を用いることで，自然対流の影響を受けない液滴の燃え広がり現象を観察することができる．

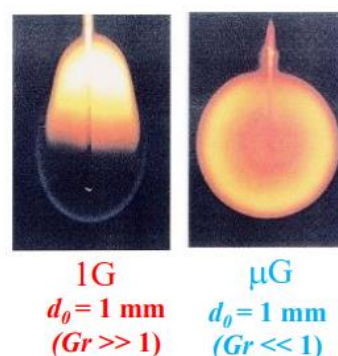


Fig. 1 difference in flame spread due to natural convection

#### 1.4 先行研究

燃料液滴が空間にランダムに分散する液滴群が燃え広がる際には、液滴数密度（または平均液滴間隔）の臨界値を境に部分的燃焼状態から全体の群燃焼状態へと遷移することがパーコレーション理論から予想される。

2017年に微小重力条件下における実験時間の延長が期待できるISSの日本実験棟kiboでランダム分散液滴群の群燃焼発現メカニズムを解明するために最初の液滴燃焼実験が行われた。<sup>[1]</sup>群燃焼実験では、ランダム分散液滴群の液滴相互作用の影響を調査するために干涉燃焼液滴の燃え広がり限界距離を調査する液滴群要素を用いた研究<sup>[2]</sup>とランダム分散液滴群を用いた研究<sup>[3-5]</sup>が行われた。

ランダム分散液滴群の群燃焼発生限界近くで、複数の未燃液滴群が同時に燃え出す大規模着火現象が観測された。

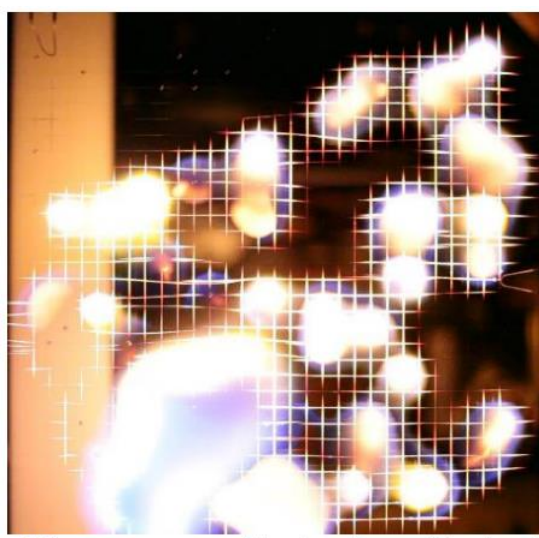


Fig. 2 Lighten-composite image of flame-spread behavior with 1-s intervals of randomly distributed droplet clouds <sup>[4]</sup>.

冷炎と予混合気が大規模着火現象に寄与したのではないかと仮説が立てられ、液滴群要素を使って火炎伝播限界の外側に存在する単一未燃液滴の冷炎による気化特性および予熱された液滴群要素周辺に形成された予混合気による火炎伝播挙動を評価する検証<sup>[6]</sup>が行われた。

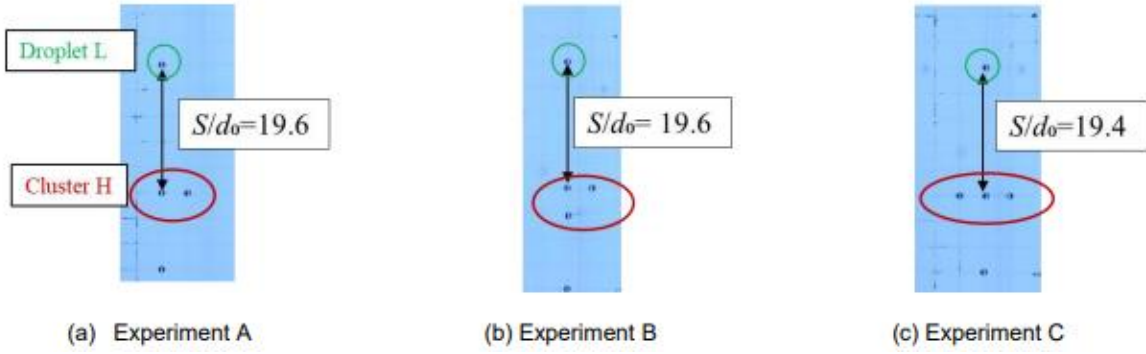


Fig. 3 Back-illuminated images of droplet-cloud elements with interactive burning droplets (Cluster H) to heat Droplet L existing outside the flame-spread limit. <sup>[6]</sup>

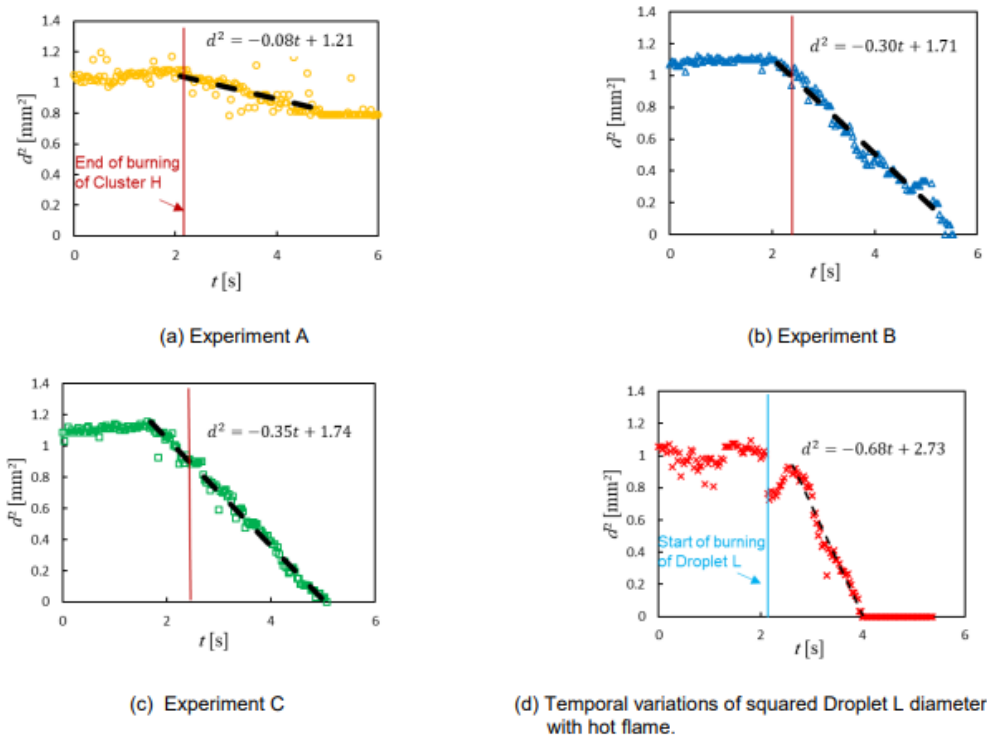


Fig. 4 Temporal variations of the squared diameter of Droplet L for different droplet-cloud elements. An approximation line during vaporization is also shown for each condition. <sup>[6]</sup>

未燃液滴の蒸発は火炎伝播限界の外に存在する火炎から熱伝達された。

熱伝達が特定の値を超えると、熱伝達の終了後も冷炎によって未燃液滴は蒸発するため、予混合気は未燃液滴の周辺に急速に形成される。

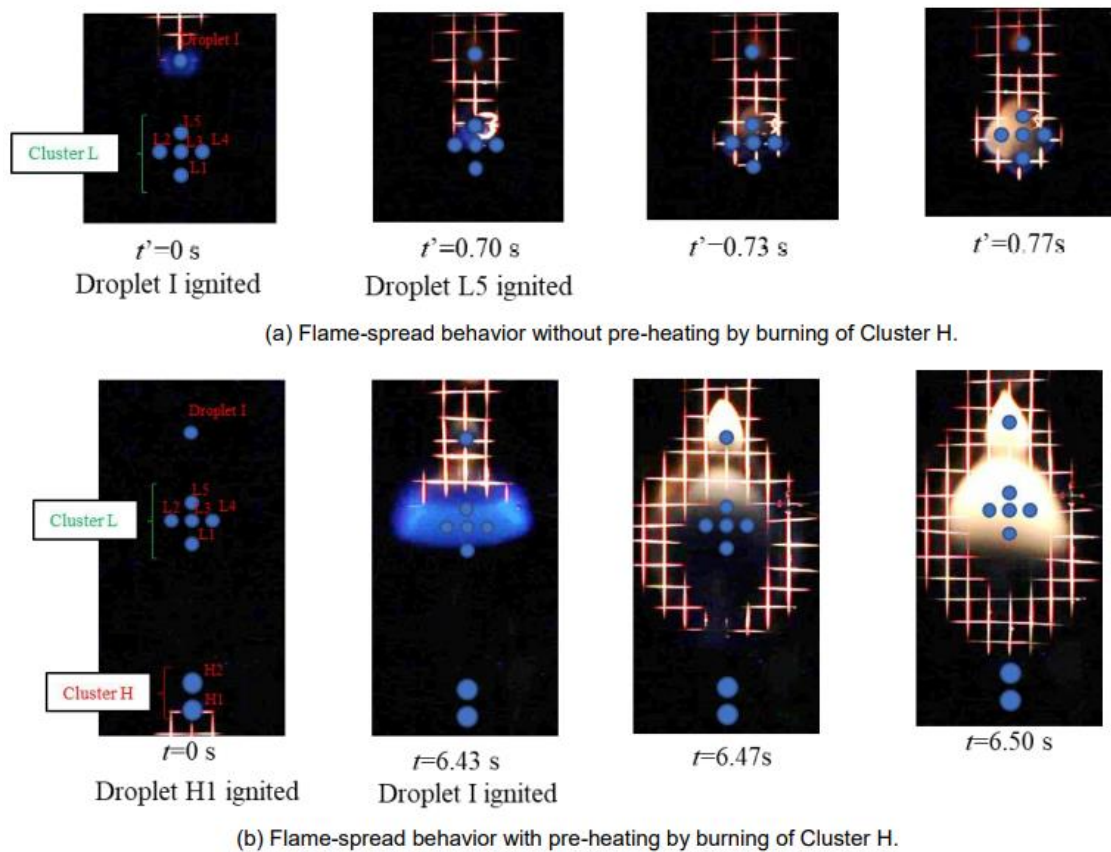


Fig. 5 Flame-spread behavior of Cluster L without and with a large-scale ignition phenomenon<sup>[6]</sup>

火炎伝播限界の外にある火炎により予熱された液滴群の複数の液滴の蒸発によって大きい予混合気は形成された。冷炎は複数の液滴の周辺に現れて、蒸発を高めた。大規模着火現象は大きい予混合気の着火により生じる。

### 1.5 目的

液滴間の火炎の燃え広がりや群燃焼の発生過程を適切に取り扱うことができるモデルの構築が求められており、液滴間燃え広がりを通して液滴燃焼の知見を複雑な噴霧燃焼の理解へ繋げることが必要である。Mikami ら<sup>[1, 3-5]</sup>のランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼発生メカニズムに関する燃焼実験で観測された大規模着火現象の現象理解をするために本研究では、液滴群要素を使って火炎伝播限界の外側に存在する単一未燃液滴の冷炎による気化特性の調査(未燃焼ケース)及び予熱された液滴群周辺に形成された予混合気の有無による火炎伝播挙動の調査(燃焼ケース)を数値シミュレーションによって比較し、冷炎・予混合気が着火・燃え広がり過程に与える影響を調査することを目的とする。

## 第2章 計算方法

### 2.1 支配方程式

気相の支配方程式<sup>[11]</sup>を以下に示した.

Table 1 governing equations of gas phase

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 質量       | $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S_m \quad (2)$                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 運動量      | $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \sigma_{ij}) - \rho g_i = S_{ui} \quad (3)$ $\sigma_{ij} = 2\mu \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$ |
| エネルギー    | $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n h_k (\rho a - \rho D_k) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right] = S_h \quad (4)$                                                                                                                  |
| 化学種の質量分率 | $\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_k - \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}) = S_{combu,k} + S_{Y_k} \quad (5)$                                                                                                                                                                               |

$u_i$  : 気相速度、 $\rho$  : 密度、 $\mu$  : 粘度、 $P$  : 静圧、 $g_i$  : 重力加速度、 $h$  : 比全エンタルピー、 $a$  : 気相熱拡散率、 $h_k$  : 比エンタルピー、 $Y_k$  : 質量分率、 $D_k$  : 質量拡散係数、 $\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ関数、 $S_m$ ,  $S_{ui}$ ,  $S_h$ ,  $S_{Y_k}$ ,  $S_Z$  : 気相と分散相の間の相互作用、 $S_{combu,k}$  : 燃焼によるソース項を表している. 気相と分散相の間のソース項は総合液滴数 $N_d$ を用いて表され、気相計算のコントロールボリューム内に存在する.

$$S_m = -\frac{1}{\Delta V} \sum^{N_d} \frac{dm_d}{dt} \quad (6)$$

$$S_{ui} = -\frac{1}{\Delta V} \sum^{N_d} \left[ \frac{m_d f_1}{\tau_d} (u_i - u_{d,i}) + \frac{dm_d}{dt} u_{d,i} \right] \quad (7)$$

$$S_h = -\frac{1}{\Delta V} \sum^{N_d} \left[ \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (m_d u_{d,i} u_{d,i}) + Q_d + \frac{dm_d}{dt} h_{v,s} + Q_{rad} \right] \quad (8)$$

$$S_{Y_k} = \begin{cases} -\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_d}{dt}, & \text{if } k = F(\text{fuel}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$m_d$  : 液滴質量、 $u_{d,i}$  : 液滴速度、 $\Delta V$  : 気相計算のコントロールボリュームの体積、 $h_{v,s}$  : 液滴面で蒸発した蒸気エンタルピー、 $Q_d$  : 対流熱伝達、 $Y_{O_2}$  : 空気中の酸素の質量分率を表している.

化学種のソース項 $S_{combu,k}$ は以下で表される.

$$S_{combu,k} = -\frac{n_k}{n_F} \cdot \frac{W_k}{W_F} \cdot \dot{\omega}_F \quad (10)$$

ここで、 $n_k$  : k 化学種のモル化学量論的係数、 $n_F$  : 1 ステップグローバルリアクション（生成の正の向き）のモル化学量論的係数、 $W_k$  : k 化学種の分子量、 $W_F$  : 燃料の分子量を表している。

燃料液滴はラグランジュ法によって個別に追跡されており、液滴方程式<sup>[11]</sup>を Table 2 に示した。

Table 2 governing equations of droplet

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 温度 | $\frac{dT_d - Q_d + (dm_d/dt)L_v + Q_{rad,d}}{dt m_d c_{p,d}}$ $= \frac{Nu}{3Pr} \left( \frac{c_p}{c_{p,d}} \right) \left( \frac{f_2}{\tau_d} \right) (T - T_d) + \frac{1}{m_d} \left( \frac{dm_d}{dt} \right) \frac{L_v}{c_{p,d}} + \frac{1}{m_d c_{p,d}} \times \left[ A_d \varepsilon_d \left( \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega / 4 - \sigma T_d^4 \right) \right] \quad (11)$ |
| 質量 | $\frac{dm_d}{dt} = - \frac{Sh}{3Sc} \frac{m_d}{\tau_d} \ln(1+B_M) \quad (12)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

T: 気相温度,  $C_p$ : 混合気体の比熱,  $C_{p,d}$ : 液体の比熱,  $L_v$ : 温度  $T_d$  での蒸発の潜熱,  $A_d$ : 液滴の投影面積,  $\varepsilon_d$ : 液滴の吸光度,  $\sigma$ : ステファンボルツマン定数,  $\tau_d$ : 粒子反応時間,  $B_M$ : 物質移動数, Pr: プラントル数, Nu: ヌセルト数, Sc: シュミット数, Sh: シャーウッド数,  $f_1$ : ストークスドラッグの修正,  $f_2$ : 熱輸送の修正を表している。

## 2.2 輻射モデル

輻射熱伝達は discrete ordinate 法を基に計算される。発光・吸収媒体の小さい差分体積を通して、特定の方向  $\Omega$  を通るエネルギーのバランス方程式を記述した。

$$\Omega \cdot \nabla I(r, \Omega) = -(\alpha + \kappa) I(r, \Omega) + \alpha I_b(r) + \frac{\kappa}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \times \phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega \quad (13)$$

ここで、 $I(r, \Omega)$ : 輻射強度,  $I_b(r)$ : 中間温度での黒体輻射の強度,  $\alpha$ : 媒体のプランク平均吸収係数,  $\kappa$ : 散乱係数,  $\phi(\Omega' \rightarrow \Omega)$ : 入ってくる方向  $\Omega'$  から出ていく方向  $\Omega$  へのエネルギー輸送の位相関数を表す。現在の計算では右辺第三項として与えられる散乱は無視され、粒子群による等方性吸収と放出は右辺第一項で考慮された。 $\alpha$  の値は詳細 narrowband モデル RADCAL を使って計算されており、

$$\alpha = \int_0^\infty i_{b,\lambda} \alpha_\lambda d\lambda / I_b \quad (14)$$

$\kappa$ の値はそれぞれのセルにおける液滴サイズと数密度に基づいて決められており,

$$\kappa = \eta_s \cdot \pi d_d^2 / 4 \cdot N_d \quad (15)$$

ここで,  $i_{b,\lambda}$ : プランク黒体関数,  $\alpha_\lambda$ : 分光吸収係数の表にまとめられたデータ,  $\eta_s$ : 液滴の散乱効率係数,  $N_d$ : 単位体積当たりの液滴の数を表している.

式は輻射輸送方程式の離散化のために書き直すことができる.

$$\mu_m \frac{\partial I^m}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I^m}{\partial y} + \eta_m \frac{\partial I^m}{\partial z} = -(\alpha + \kappa) I^m + \alpha I_b \quad (16)$$

### 2.3 計算条件

本研究の燃料液滴として  $C_{10}H_{22}$  が用いており, 数値解析手法として直接数値計算 (DNS) を使用して, 72 化学種, 280 素反応を計算している. 燃焼解析コードは FFR-Comb, 輻射モデルは discrete ordinate 法<sup>[8]</sup>, 蒸発モデルは非平衡 Langmuir-Knudsen モデル<sup>[7]</sup>が用いられている.

#### 2.3.1 未燃焼ケース

初期条件, 計算領域を Table 3 に示した.

Table 3 calculation conditions for unburned case

|      |                                                           |
|------|-----------------------------------------------------------|
| 時間刻み | 10 $\mu s$                                                |
| 初期温度 | 293 K                                                     |
| 初期圧力 | 0.1 MPa                                                   |
| 節点数  | 502308                                                    |
| 要素数  | 491072                                                    |
| 計算領域 | 立方体<br>-140 < x < 140<br>-120 < y < 120<br>-100 < z < 100 |

Fig. 6 に液滴配置を示した. 液滴 1 を着火源とし, 群火炎を形成し, 燃え広が  
り限界の外側に位置する液滴 5 の燃焼特性を評価する. 直径は 1 mm とする.

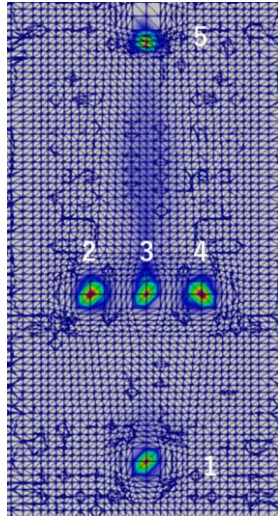


Fig. 6 droplet placement for unburned case

Table 4 に未燃焼ケースの液滴の座標を示した.

Table 4 droplet coordinates for unburned case

|          | x  | y   |
|----------|----|-----|
| Droplet1 | 0  | -12 |
| Droplet2 | -4 | 0   |
| Droplet3 | 0  | 0   |
| Droplet4 | 4  | 0   |
| Droplet5 | 0  | 20  |

### 2.3.2 燃焼ケース

初期条件，計算領域を Table 5 に示した．

Table 5 calculation conditions for combustion case

|      |                                               |
|------|-----------------------------------------------|
| 時間刻み | 10 $\mu$ s                                    |
| 初期温度 | 293 K                                         |
| 初期圧力 | 0.1 MPa                                       |
| 節点数  | 1289151                                       |
| 要素数  | 1263744                                       |
| 計算領域 | 立方体<br>-140<x<140<br>-162<y<162<br>-100<z<100 |

Fig. 7 に燃焼ケースの液滴配置を示した．液滴 I の着火からクラスター L へ火炎を伝播する直前のクラスター H による予熱の有無で 2 条件を比較する．予熱しない場合を case 1, 予熱した場合を case2 とする．各液滴の直径は 1 mm であり，クラスター H のみ 2 mm とする．

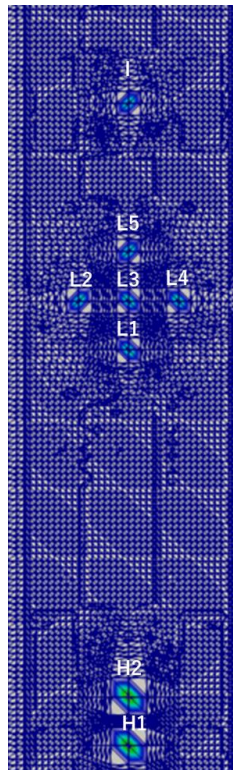


Fig. 7 droplet placement for combustion case

Table 6 に燃焼ケースの液滴の座標を示した.

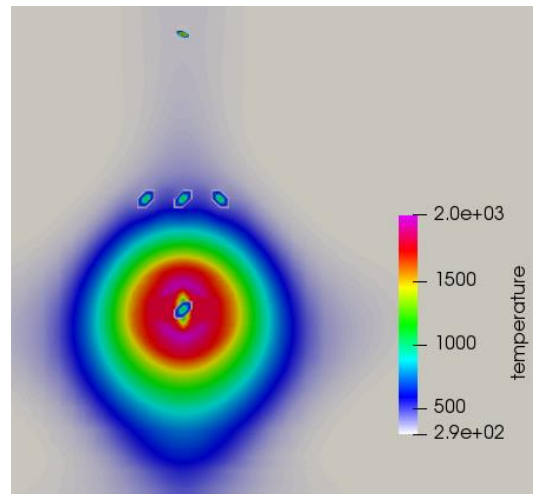
Table 6 droplet coordinates for combustion case

|            | x  | y   |
|------------|----|-----|
| Droplet I  | 0  | 16  |
| Droplet L1 | 0  | -4  |
| Droplet L2 | -4 | 0   |
| Droplet L3 | 0  | 0   |
| Droplet L4 | 4  | 0   |
| Droplet L5 | 0  | 4   |
| Cluster H1 | 0  | -36 |
| Cluster H2 | 0  | -32 |

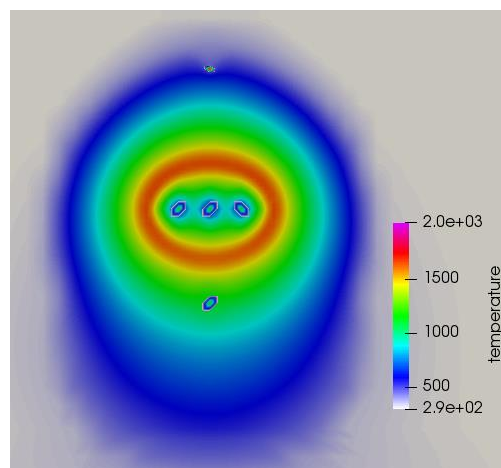
### 第3章 結果と考察

#### 3.1 未燃焼ケースの解析結果と考察

Fig. 8 に可視化した温度を示した.



(a)  $t=0.5 \text{ s}$



(b)  $t=2.5 \text{ s}$

Fig. 8 state of the temperature of the unburned case

着火源からクラスターに火炎が伝播して、群火炎を形成し、液滴 5 に火炎が伝播していない様子が確認できた.

Fig. 9 に液滴径の時間変化を示した.

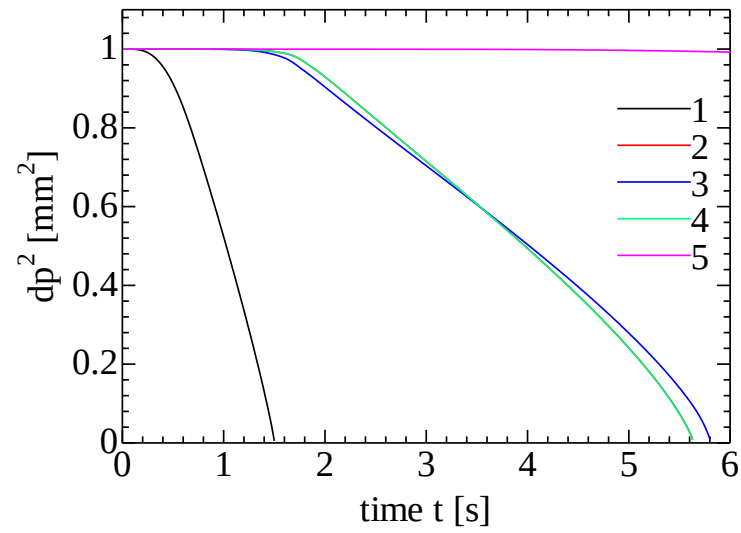


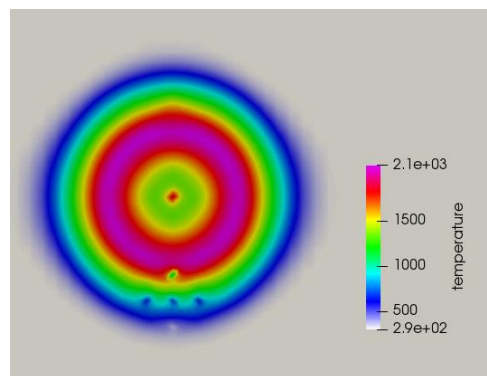
Fig. 9 droplet diameter during combustion

燃え広がり限界の外に位置する液滴 5 が蒸発する様子は観察できなかった。

質点近似によりモデル化しているため精度が良くなかったことと輻射モデルが適切でなかったことが考えられた。

### 3.2.1 燃焼ケースの解析結果と考察

Fig. 10 にクラスターL の可視化した温度の時間変化を示した。



(a)  $t = 0.3 \text{ s}$

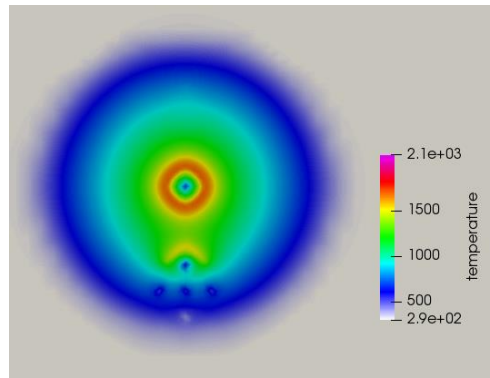
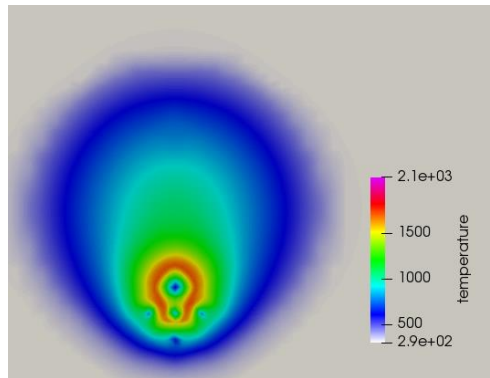
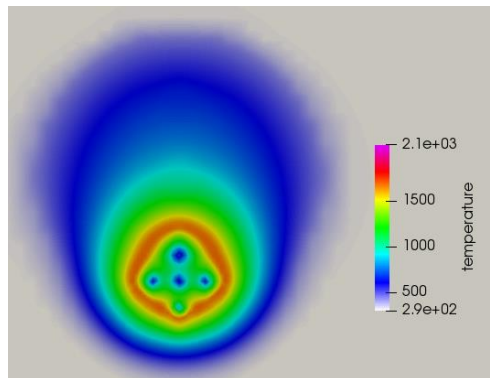
(b)  $t = 0.6$  s(c)  $t = 0.9$  s(d)  $t = 1.2$  s

Fig. 10 state of the temperature of the combustion case

着火源である液滴 I から①L5, ②L3, ③L2, L4, ④L1 の順に火炎が伝播していく様子が確認できた. 両ケースで L5 の着火から L1 が着火するまでの期間で  $C_{10}H_{22}$  の分布を case1 と共に示した. 低温酸化反応を識別するため 800 K 以下の領域を色付きで表している.

$t^*$ は case1 の L1 が着火した時点を 1 として規格化した無次元時間とする.

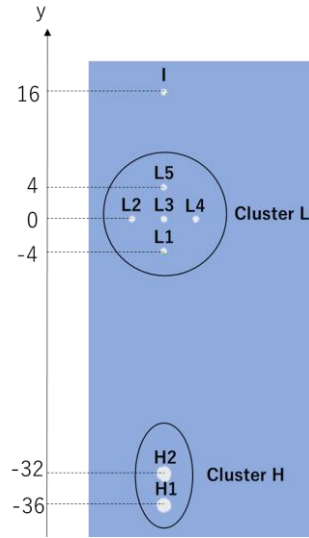
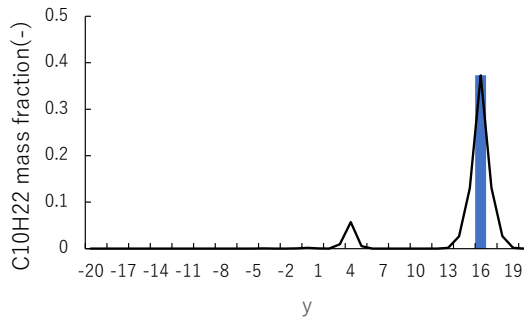
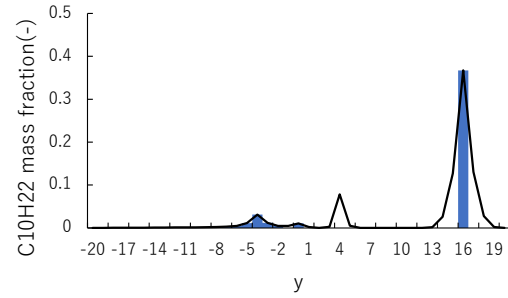


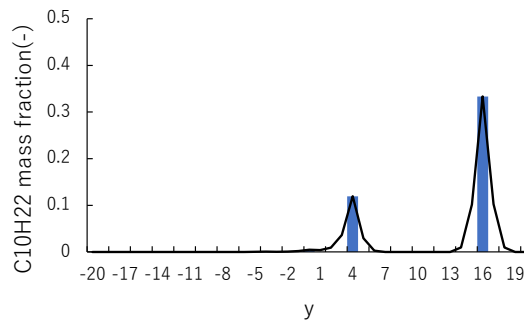
Fig. 11 droplet placement with coordinates



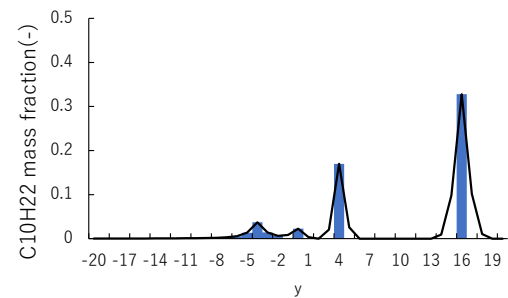
(a)  $t^*=0.36$  [-] (case1)



(b)  $t^*=0.36$  [-] (case2)



(c)  $t^*=0.45$  [-] (case1)



(d)  $t^*=0.45$  [-] (case2)

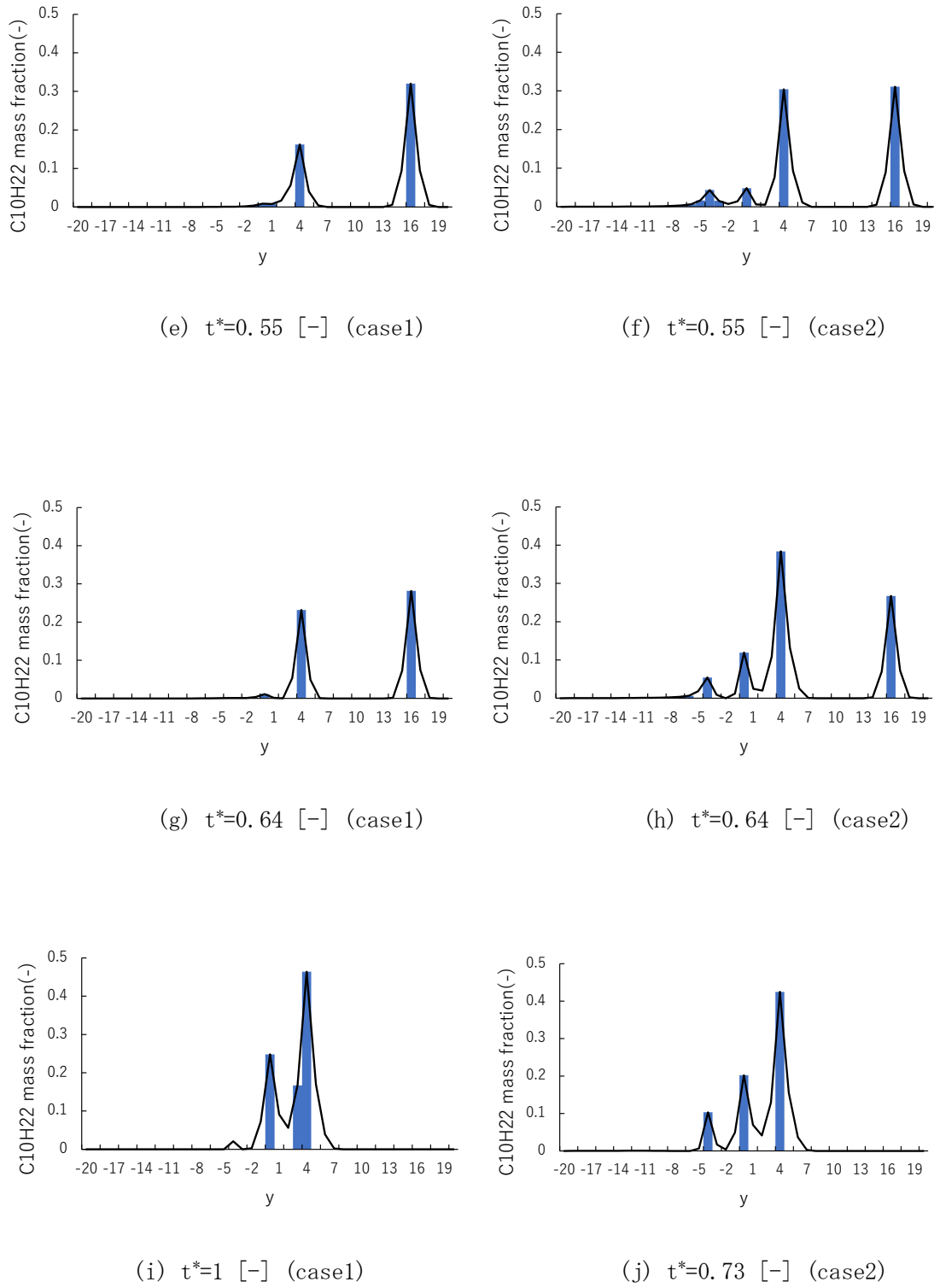
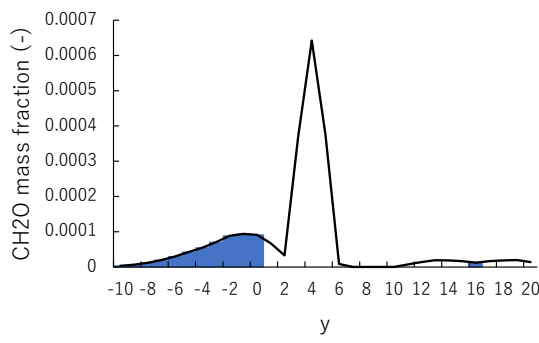


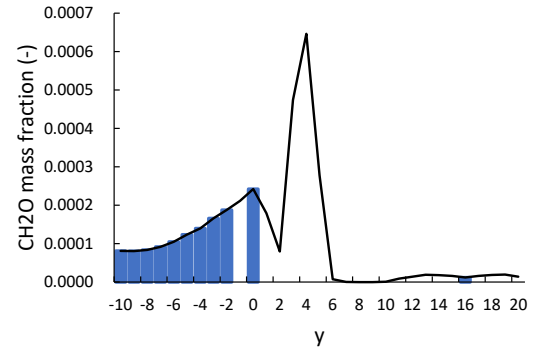
Fig. 12 distribution of n-decane

Case2においてL5の着火時( $t^*=0.36$ )にL3とL1がクラスターHからの熱流速によって正デカンが予蒸発していることが確認できた。

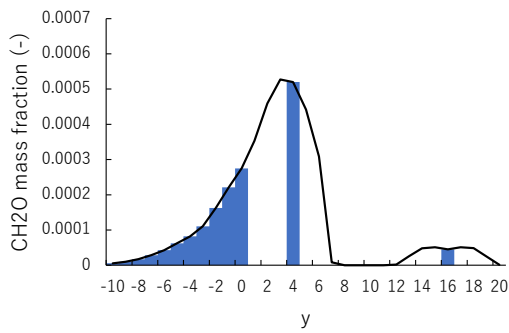
Case2 において L5 の着火から L1 が着火するまでの期間で  $\text{CH}_2\text{O}$  の分布を case1 と共に示した。



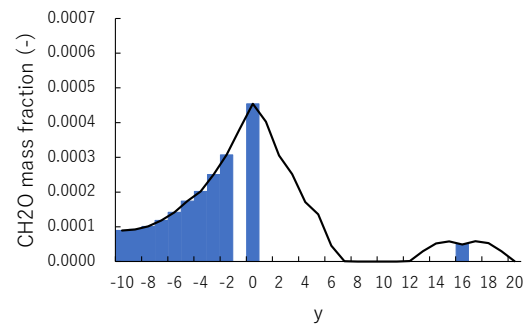
(a)  $t^*=0.36$  [-] (case1)



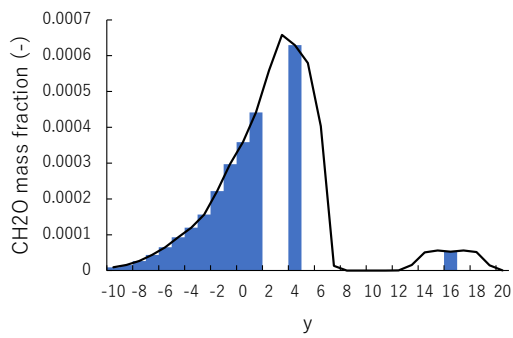
(b)  $t^*=0.36$  [-] (case2)



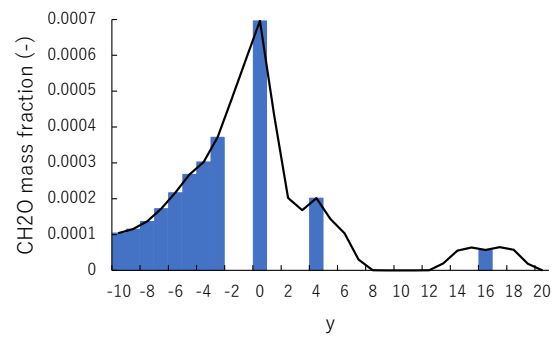
(c)  $t^*=0.45$  [-] (case1)



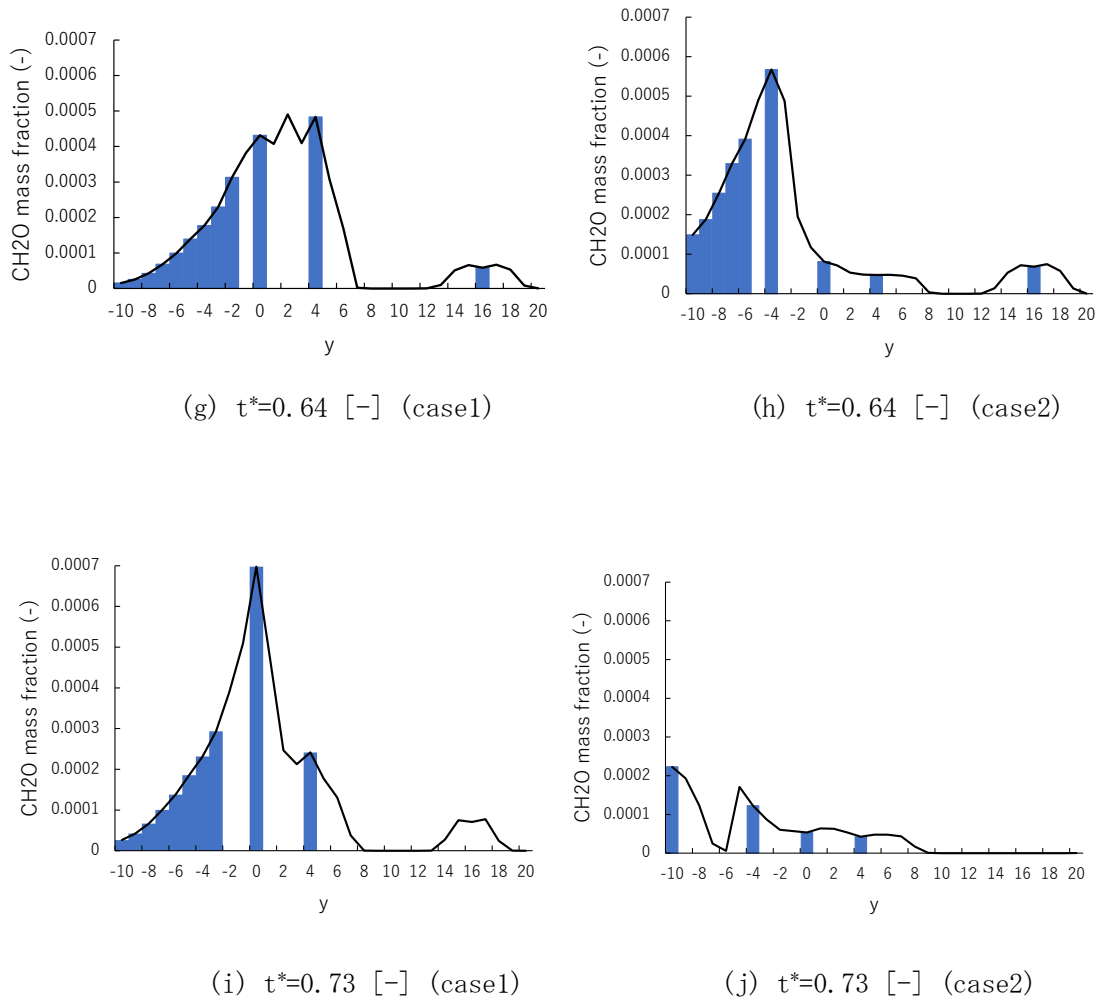
(d)  $t^*=0.45$  [-] (case2)



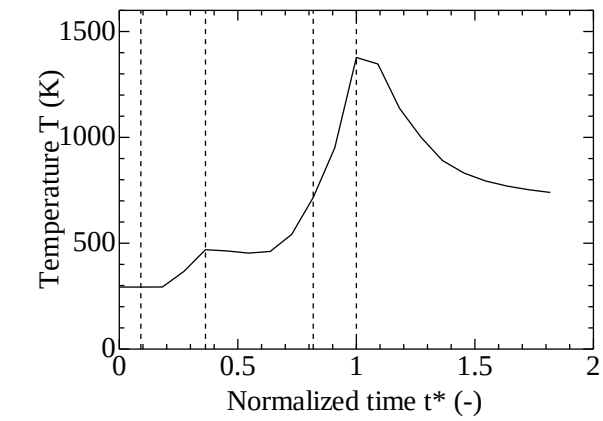
(e)  $t^*=0.55$  [-] (case1)



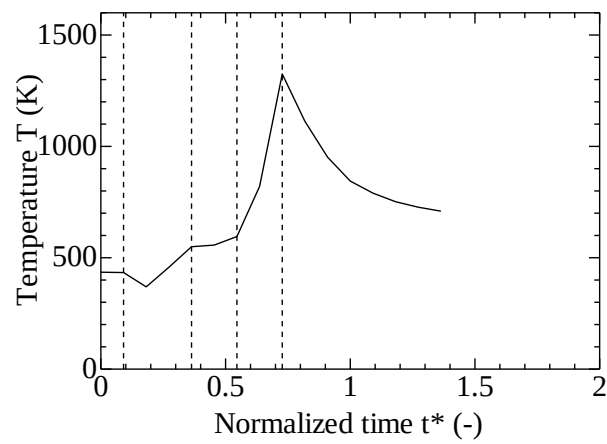
(f)  $t^*=0.55$  [-] (case2)

Fig. 13 distribution of CH<sub>2</sub>O

L5 の着火時 ( $t^*=0.36$  [-]) において低温領域の分布が広く、生成量が大きくなっていた。また、時間の経過につれ、2 ケースにおける波形のズレが生じており、反応速度が異なっていることが分かった。更に詳細に確認するため、L1 の 1 mm 下の位置における温度の時間変化を示した。



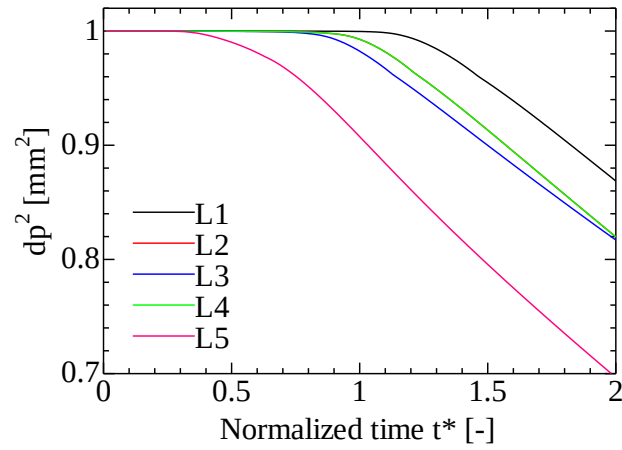
(a) case1



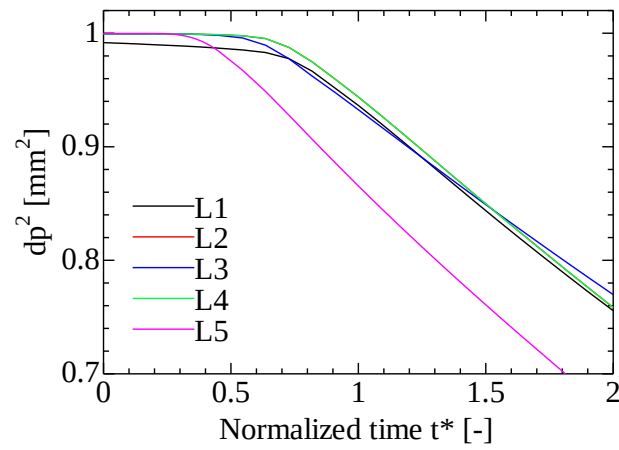
(b) case2

Fig. 14 variation of temperature at 1mm below of L1

液滴 L1 の着火のタイミングは case2 の方が約 30 %早まっていた。  
 液滴径の時間変化を示した。



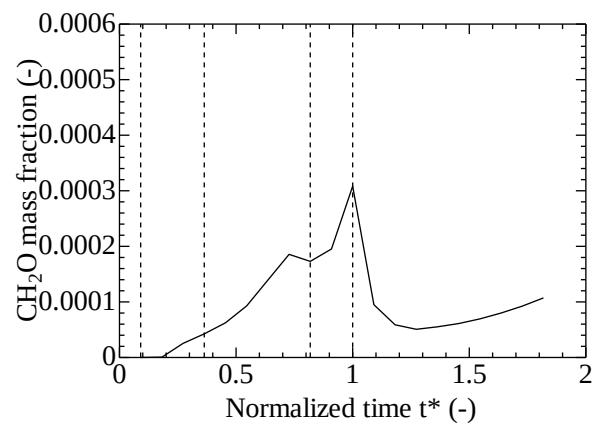
(a) case1



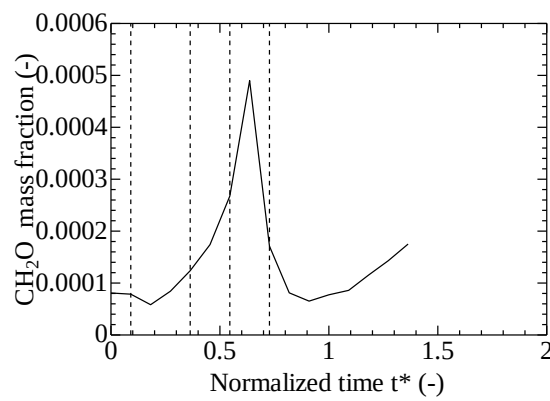
(b) case2

Fig. 15 variation of square of droplet diameter

クラスターHの燃焼からの熱流束によって液滴L1の蒸発が早く促進されていた。  
L1の1 mm下の位置におけるCH<sub>2</sub>Oの時間変化を示した。



(a) case1



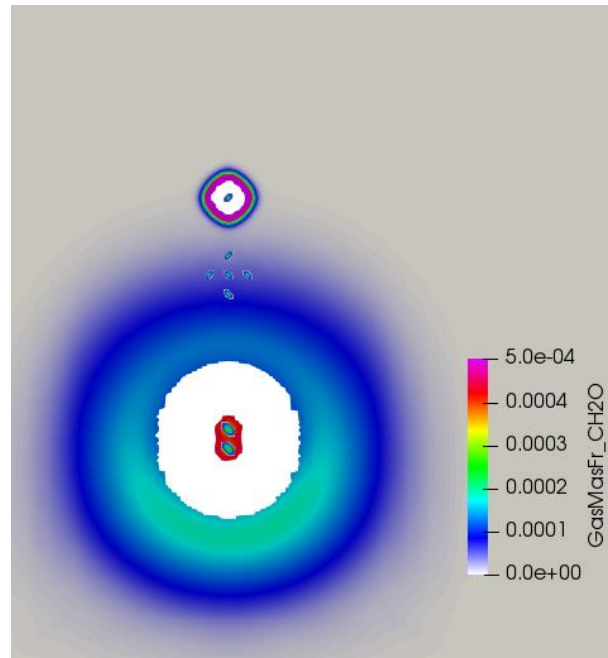
(b) case2

Fig. 16 variation of  $\text{CH}_2\text{O}$  at 1mm below of L1

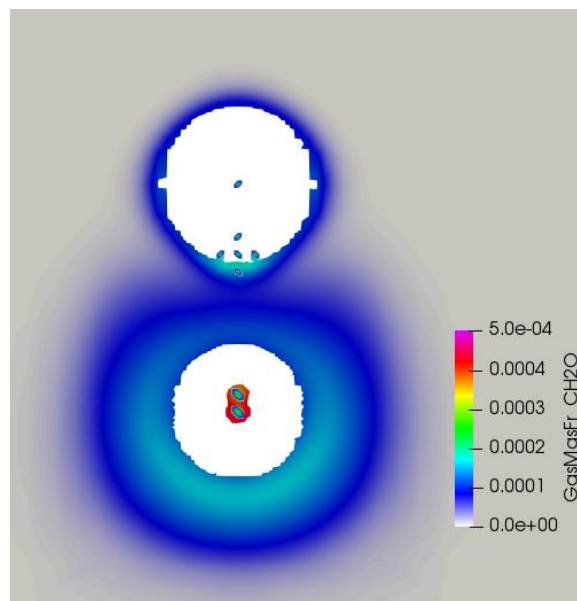
左から4番目の破線は液滴 L1 が着火したタイミングを表しており, case2 の方が着火前にピーク値を迎えており, 生成量も大きかった.

### 3.2.2 冷炎に寄与する化学種の可視化

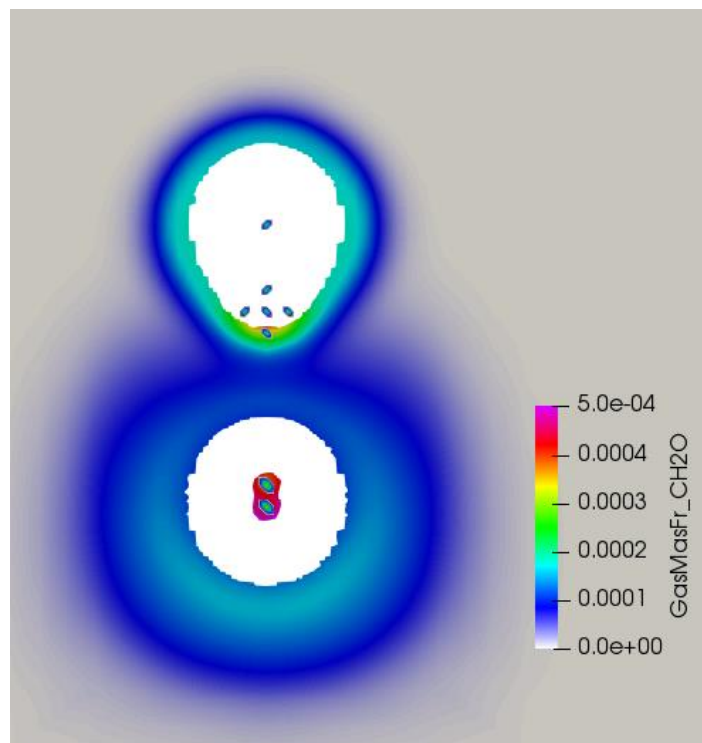
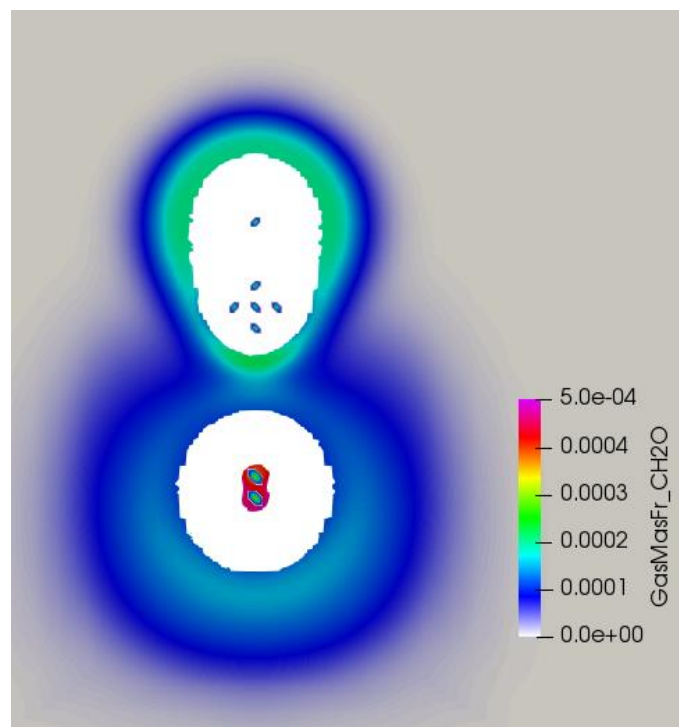
これまで冷炎を追跡するマーカーとして  $\text{CH}_2\text{O}$  を用いてきたが、低温酸化反応に寄与する他の化学種を調査するため、液滴 I の着火から液滴 L1 の着火までの期間で case2 における  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_{10}\text{H}_{21}$ ,  $\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{OO}$ ,  $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{OOH}$ ,  $\text{OOC}_{10}\text{H}_{20}\text{OOH}$ ,  $\text{C}_{10}\text{ket}$ ,  $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{CO}$  の分布を可視化した。

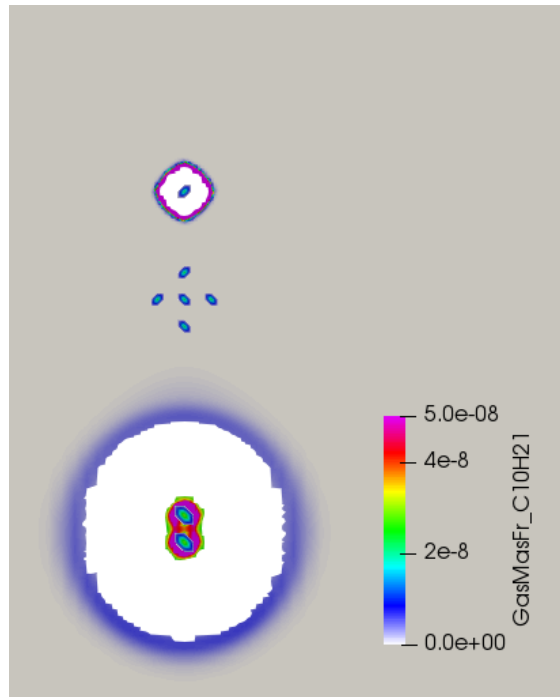
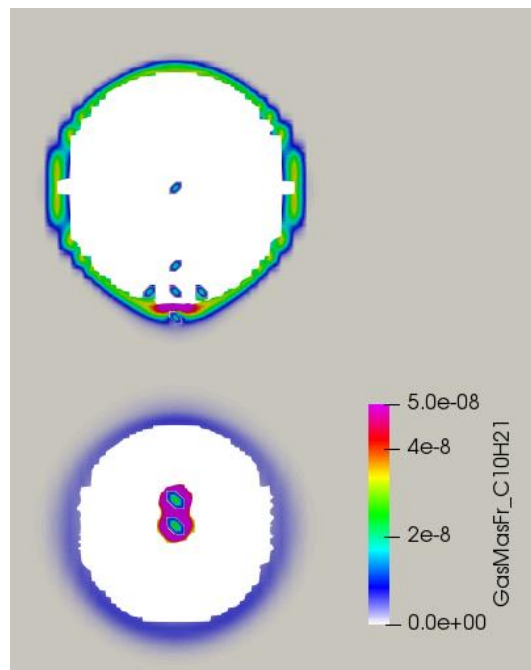


(a)  $t^*=0.09$  [-]



(b)  $t^*=0.36$  [-]

(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]Fig. 17 visualization of CH<sub>2</sub>O distribution

(a)  $t^*=0.09$  [-](b)  $t^*=0.36$  [-]

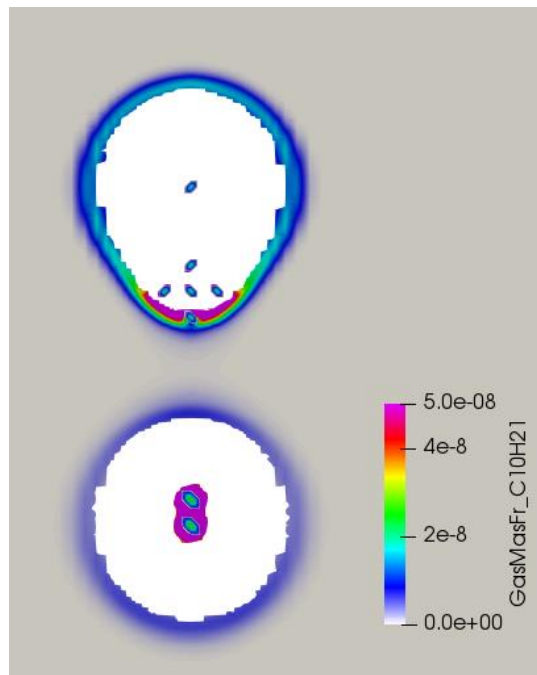
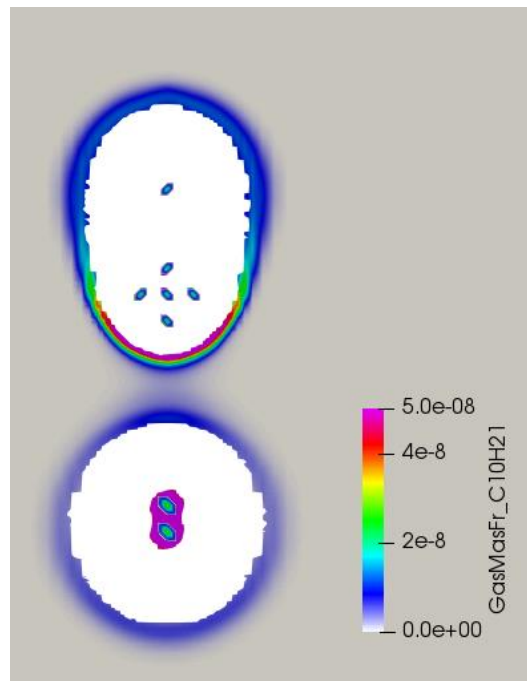
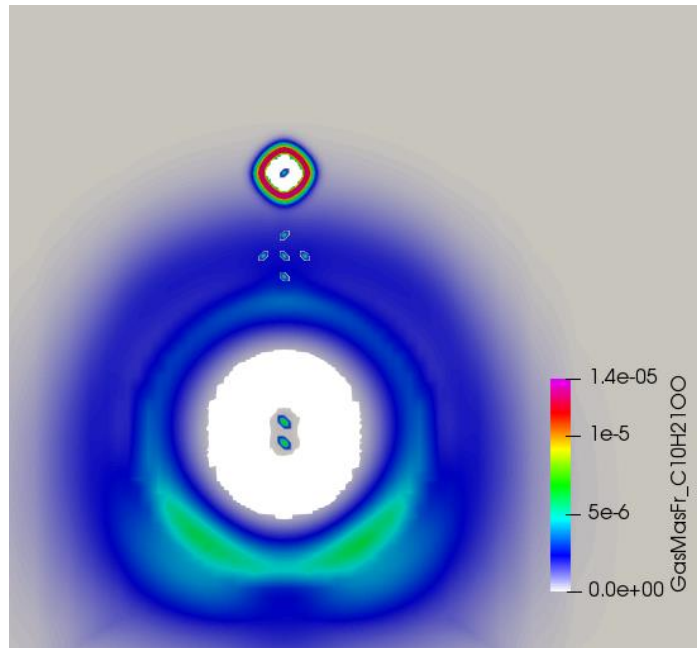
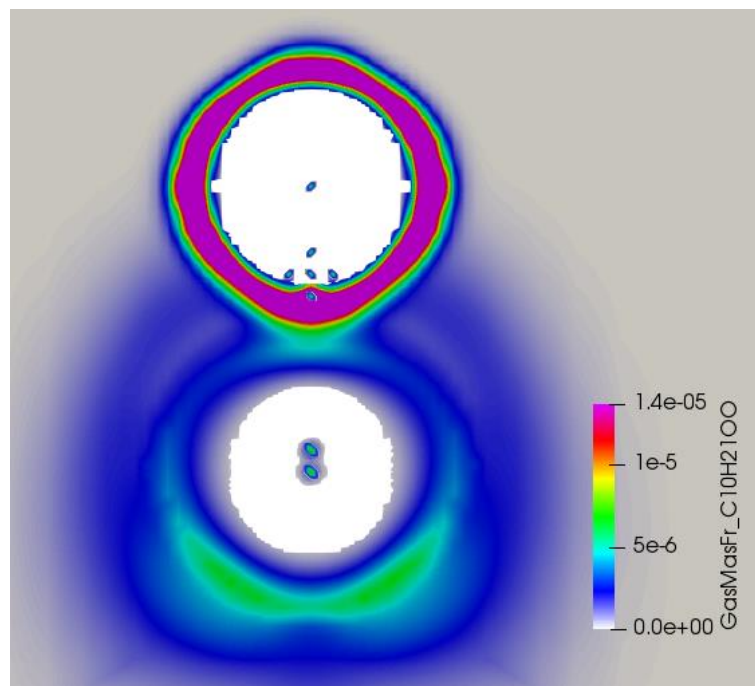
(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]

Fig. 18 visualization of C10H21 distribution

(a)  $t^* = 0.09$  [-](b)  $t^* = 0.36$  [-]

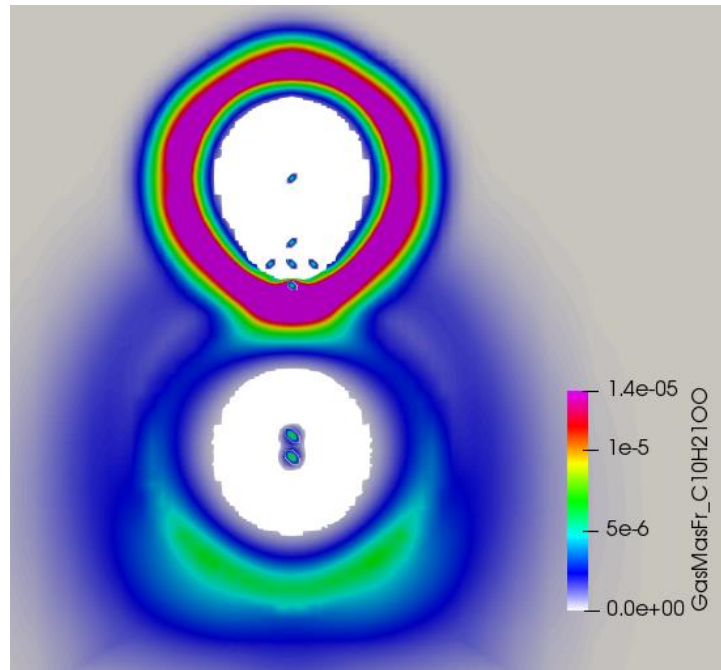
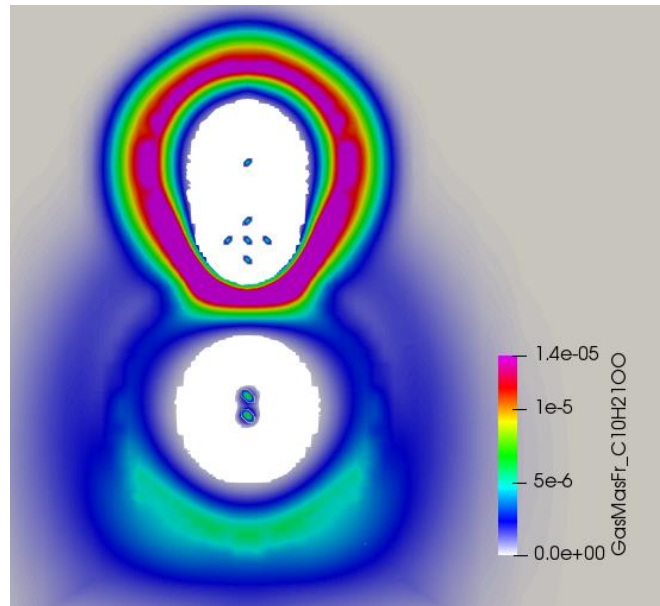
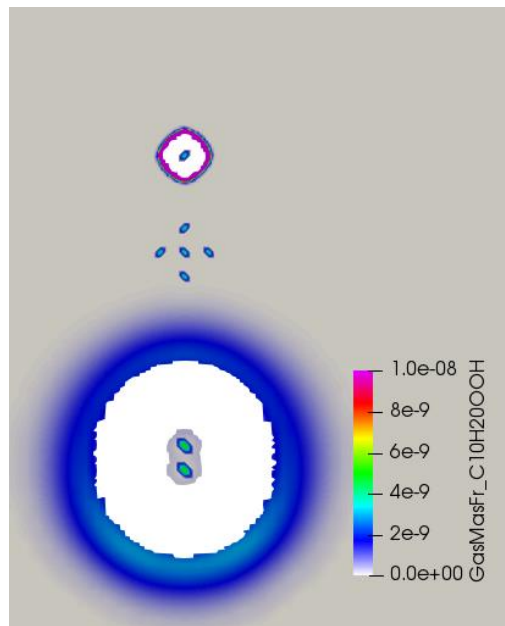
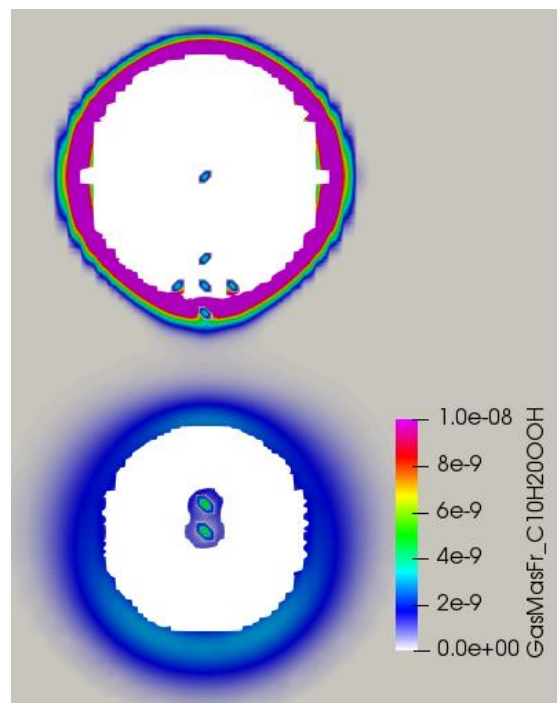
(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]

Fig. 19 visualization of C10H2100 distribution

(a)  $t^*=0.09$  [-](b)  $t^*=0.36$  [-]

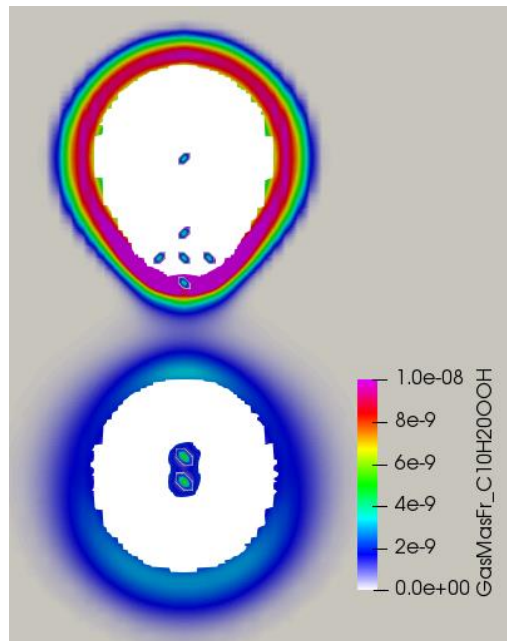
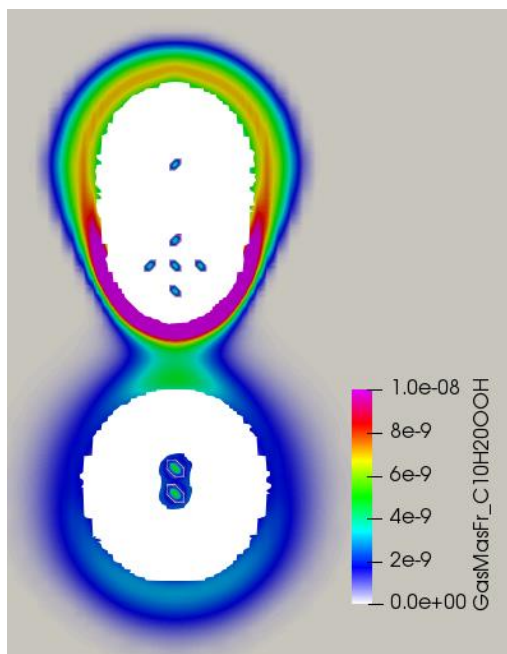
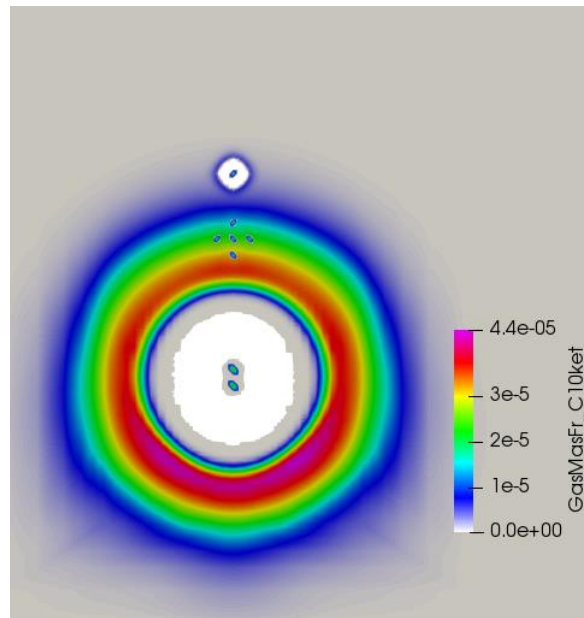
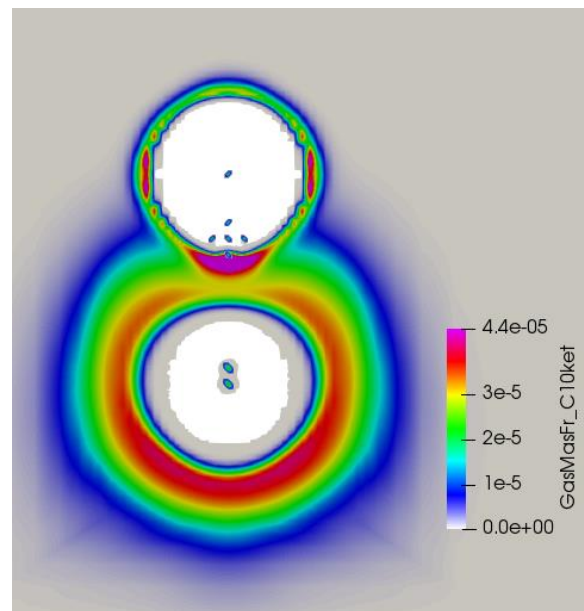
(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]

Fig. 20 visualization of C10H2000H distribution

(a)  $t^*=0.09$  [-](b)  $t^*=0.36$  [-]

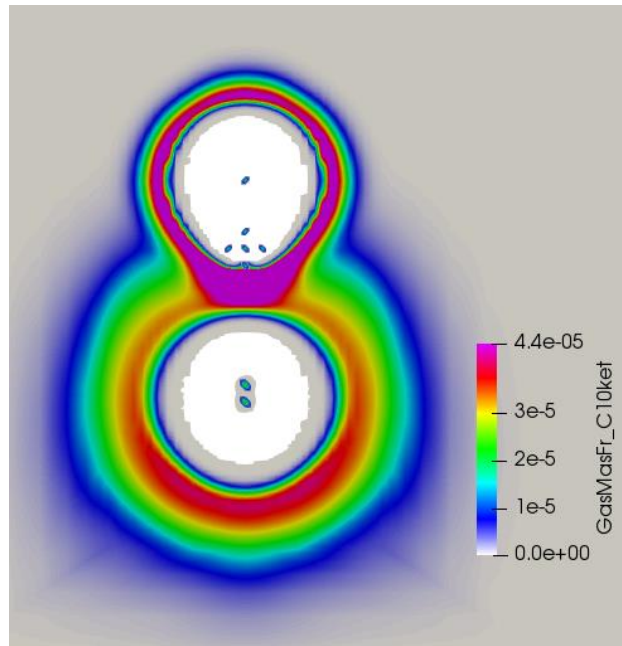
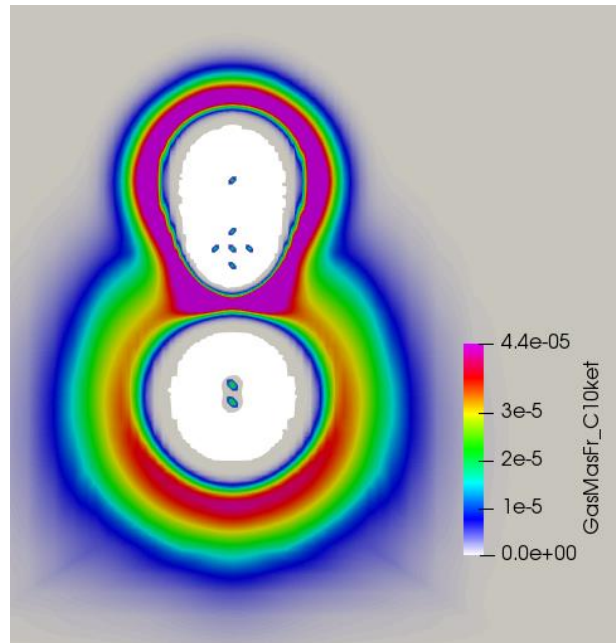
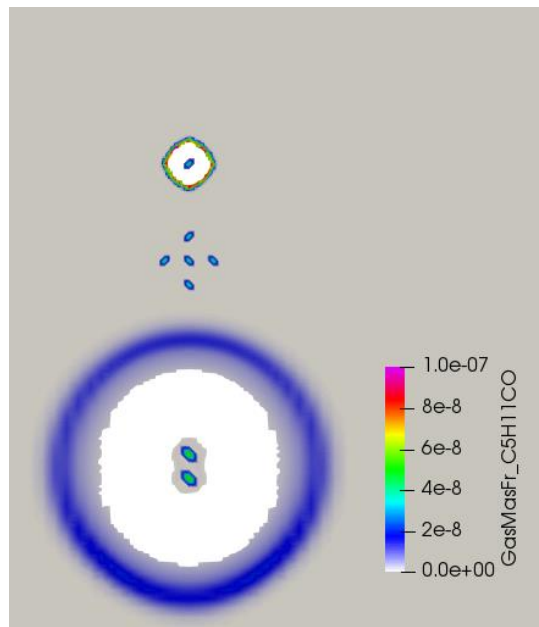
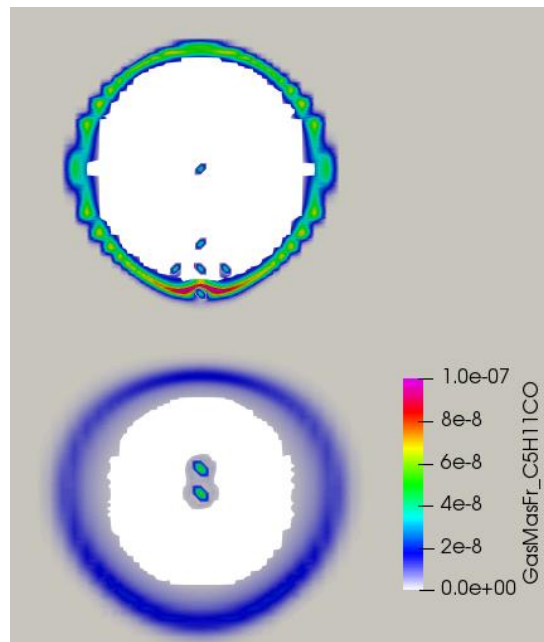
(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]

Fig. 21 visualization of C10ket distribution

(a)  $t^* = 0.09$  [-](b)  $t^* = 0.36$  [-]

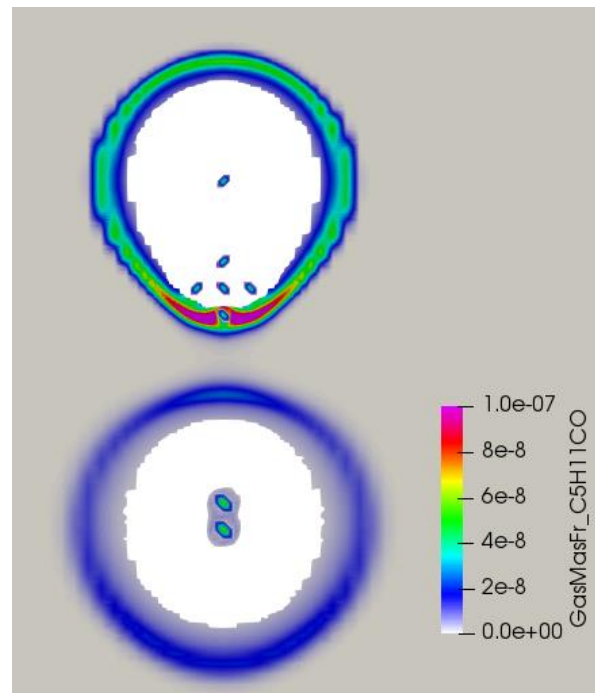
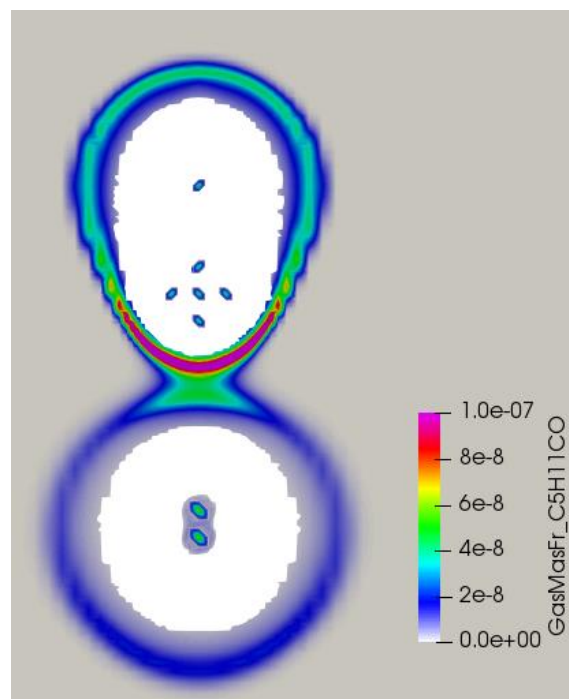
(c)  $t^*=0.55$  [-](d)  $t^*=0.73$  [-]

Fig. 22 visualization of C5H11CO distribution

液滴 L1 の 1 mm 下において温度が急激に上昇し始めたタイミング ( $t^*=0.55$  [-]) で  $\text{CH}_2\text{O}$  の濃度が濃くなっていることが確認でき、 $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{CO}$  にも類似するような特徴が見られた。

## 第4章 結言

### 4.1 まとめ

Mkami らのランダム分散液滴群の燃え広がり と群燃焼発現メカニズムに関する燃焼実験で観測された大規模着火現象の現象理解をするために本研究では、液滴群要素を使って火炎伝播限界の外側に存在する単一未燃液滴の冷炎による気化特性の調査(未燃焼ケース)及び予熱された液滴群周辺に形成された予混合気の有無による火炎伝播挙動の調査(燃焼ケース)を数値シミュレーションによって行った。

未燃焼ケースにおいては燃え広がり限界の外に位置する単一液滴が蒸発する様子は観察できなかった。この理由として質点近似によりモデル化しているため精度が良くなかったことと輻射モデルが適切でなかったことが考えられた。

燃焼ケースの case2 においてはクラスターH による予熱によってクラスターL の予蒸発が起こっており、液滴 L1 は case1 より着火が約 30 %早まっていた。

液滴 L1 の 1 mm 下の位置において液滴 L1 の蒸発の直前に  $\text{CH}_2\text{O}$  がピークを迎えており、低温酸化反応が促進されていることが分かった。

### 4.2 今後の課題と提案

液滴群要素において燃え広がり限界の外側に位置する液滴が予熱による予混合気によって着火時期を促進させることが数値計算で再現できた。本成果を基に低温酸化反応によって液滴が着火するモデルの構築が実現すれば、大規模着火現象といった複雑な群燃焼の発生過程を数値計算で考慮することができ、安全で高性能な燃焼器設計につながるのではないかと考える。

## 参考文献

- [1] M. Mikami, M. Kikuchi, Y. Kan, T. Seo, H. Nomura, Y. Suganuma, O. Moriue, D.L. Dietrich: International Journal of Microgravity Science and Application, 33(2) (2016) 330208.
- [2] Y. Yoshida, K. Iwai, K. Nagata, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: Proceedings of the Combustion Institute, 37(3) (2019) 3409.
- [3] M. Mikami, H. Nomura, Y. Suganuma, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: International Journal of Microgravity Science and Application, 35(2) (2018) 350202.
- [4] M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: Microgravity Science and Technology, 30(4) (2018) 535.
- [5] M. Mikami, Y. Yoshida, M. Kikuchi, D.L. Dietrich: 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, (July.1.-5.2019) Paper No.ASPACC2019-1504.
- [6] K. Matsumoto, Y. Yoshida, M. Mikami, M. Kikuchi: 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, (2019).
- [7] R.S. Miller, J. Bellan: Direct numerical simulation of a confined three-dimensional gas mixing layer with one evaporating hydrocarbon-droplet-laden stream, J. Fluid Mech, (1999) 384, 293-338
- [8] W.A. Fiveland: Three-dimensional radiative heat transfer solutions by discrete-ordinates method, J. Thermophys (1988) 2, 309-316
- [9] M. Mikami, H. Saputro, H. Oyagi: Microgravity-science and Technology, (2018).
- [10] Y. Yoshida, N. Sano, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, Y. Kan, M. Kikuchi: Int. J. microgravity Sci. Appl., 35(2) (2018), 350202.
- [11] H. Watanabe, R. Kurose, S. Komori, H. Pitsch: Combustion and Flame 152(2008)2-13

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、日々ご多忙の中、ご指導していただいた渡邊裕章教授に深く感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

研究を進めるにあたり、必要とされる論理的な思考力、調査能力、工夫する能力がわずかながら身に付きました。

ポスター発表では、様々な専門分野の先生方や学生の前で自身の研究を発表し、議論する大変貴重な機会をいただきました。限られた時間で研究成果を出して、外部に発信していく責任を負うことの反面、楽しさも学びました。また、研究以外においても、就活の相談に快く対応してくださり、ご指導していただきました。

自身の足りないところ、至らないところを多くご指摘していただいたことを胸にとどめ、今後の社会人生に活かしていきたいと思っております。

中間発表および最終審査では、貴重なご指導とご助言を賜りました。研究の着想から、調査、論文執筆まで多くのご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。

本研究のために調査にご協力いただいたみなさまに心から感謝いたします。

最後に、所属するエネルギー熱物理科学研究室のみなさまには多くのご支援をいただきました。お礼申し上げます。ありがとうございました。